



**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

**EAP. DE FÍSICA**

**Simulación numérica del maremoto de Camaná 2001**

**MONOGRAFÍA**

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

**AUTOR**

**Moisés León Rivera**

LIMA – PERÚ  
2015



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS  
(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE FÍSICA

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE MONOGRAFÍA TÉCNICA PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 19:00 horas del viernes 11 de diciembre del 2015, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Dr. Leonidas Ocola Aquisé (Presidente), Lic. Miguel Saavedra Juan de Dios (Miembro), Mg. César Omar Jiménez Tintaya (Asesor), se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Monografía Técnica para la Licenciatura en Física, mediante la Modalidad M3, del Bachiller.

#### LEÓN RIVERA, MOISÉS

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al Bachiller León Rivera, Moisés a realizar una exposición del Trabajo de Monografía Técnica titulada: "Simulación numérica del maremoto de Camaná 2001".

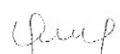
Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado. Asimismo se verificó que el promedio obtenido por el bachiller en el VII Ciclo de Actualización Profesional es de QUINCE (15).

Al término de la deliberación del Jurado, el Dr. Leonidas Ocola Aquisé invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión para dar lectura al resultado de la deliberación. El candidato ha obtenido la calificación de:

15	12	14
NOTA DEL VII CAP	NOTA DE LA SUSTENTACIÓN DE LA MONOGRAFÍA	PROMEDIO

Finalmente, el Presidente del Jurado, propone al Consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al Bachiller León Rivera, Moisés en virtud de haber obtenido un promedio de quince (15) según el artículo 46° del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ciencias Físicas. Siendo las 20:00 Horas, se levanta la Sesión.

  
Dr. Leonidas Ocola Aquisé  
PRESIDENTE

  
Lic. Miguel Saavedra Juan de Dios  
MIEMBRO

  
Mg. César Omar Jiménez Tintaya  
ASESOR

A toda la generación de físicos que apuestan por la física y el desarrollo de su País. Espero que esta monografía sea de su agrado y agradecimientos a mis padres: Saturnino Benito León López y la señora Julia Griselda Paytan gracias por el apoyo brindado.

También un agradecimiento especial al asesor Mg. Cesar Jiménez Tintaya por la ayuda brindada, gracias por la revisión y corrección del mismo también al Dr. Ocola por la revisión del presente trabajo y un agradecimiento a mis padres por el apoyo brindado ya me que apoyaron y alentaron a terminar esta monografía.

## ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice	v
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	ix
Acrónimos	x
Resumen	xi
Summary	xii

### **CAPÍTULO 1**

1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos generales	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4. Alcance	3
1.5. Planteamiento del Problema	3

### **CAPÍTULO 2**

2.1. Marco teórico: Sismos	4
2.2. Conceptos generales	6
2.2.1. Sismicidad en el Perú	6
2.3. Maremoto	8
2.3.1. Características físicas de las ondas de un maremoto	8
2.4 Ondas Mecánicas	10
2.5. Distribución estadística de maremotos	10
2.6. Maremoto del 23 de Junio del 2001	12

### **CAPÍTULO 3**

Modelo Numérico de maremotos	
3.1. Introducción	15
3.2. Metodología	16
3.2.1. Fase de inundación: Cálculo de la máxima altura de inundación	17

3.3. Pre-procesamiento	19
3.3.1. Recopilación de datos topográficos y batimétricos	19
3.4. Modelo digital de elevación y grillas	20
3.5. Modelo de fuente sísmica	21
3.6. Corrida del modelo de propagación e inundación	21

## **CAPÍTULO 4**

4.1 Área de estudio	25
4.2. Software	27
4.3. Método	27

## **CAPÍTULO 5**

5.1. Parámetros hipocentrales del sismo	29
5.2. Descripción del valor de la intensidad	29
5.3. Datos y selección de los dominios de integración	30

<b>CONCLUSIONES</b>	34
---------------------	----

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	35
-----------------------------------	----

## **ANEXO**

Anexo A: Tipos de construcciones	37
----------------------------------	----

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Imagen satelital del área de estudio (Fuente: Google Earth)	2
Fig. 2.1. Proceso de subducción entre placas	5
Fig. 2.2. Proceso de generación del maremoto en una zona de subducción	5
Fig. 2.3. Sismicidad del Perú desde 1973-2012. Fuente de datos: NEIC-USGS	7
Fig. 2.4. Características físicas de la onda de un maremoto	9
Fig.2.5. Esquema de la fase de inundación del maremoto en costa y definición de máxima altura de inundación.	9
Fig. 2.6. Ondas sísmicas P (primarias) y S (secundarias)	10
Fig. 2.7. a) Y b) Estadística de maremotos en cuanto al mecanismo de generación y distribución a nivel global	11
Fig. 2.8 Niveles medios de replegamiento del mar	13
Fig. 2.9 Ubicación del epicentro	14
Fig. 3.1 Esquema dinámico de una partícula	17
Fig. 3.2. Diagrama de flujo del Modelo Numérico Tunami	24
Fig. 4.1 Mapa de inundación según observaciones de insitu	25
Fig. 4.2. Mecanismo Focal y orientación del esfuerzo principal que dio origen al terremoto del 23 de Junio de2001	26

Fig. 5.1. Grillas anidadas para el presente modelo.	31
Fig. 5.2. Modelado de la fase de generación (Geométrica del área De ruptura)	31
Fig. 5.3. Altura de inundación o run-up	32
Fig. 5.4. Mareograma sintético en la región de inundación	33



## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Clasificación de maremotos según el momento sísmico escalar	16
Tabla 2. Parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001 y de tres de sus réplicas principales Fuente:(Camaná-2001.igp)	26
Tabla3. Parámetros del maremoto de Camaná 2001	30

## ACRÓNIMOS

DHN	Dirección de Hidrografía y Navegación
HIDRONAV	Hidroacústica y Navegación
IGP	Instituto Geofísico del Perú
NGDC	National Geophysical Data Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TUNAMI	Tsunami Inundation Modeling Exchange

## RESUMEN

El 23 de junio del 2001 a la 15:33:15 (hora local), las provincias de Camaná y Caravelí fueron afectadas por un terremoto de magnitud 8.4 Mw e intensidades de VII y VIII en la Escala de Mercalli, el epicentro se ubicó en la Costa del Sur del Perú frente a la ciudad de Ático mostrando una gran directividad hacia el Sudeste causando daños a las construcciones y ocasionando 24 muertes debido al maremoto. Con la ayuda del Modelo Numérico TUNAMI (que utiliza los programas Fortran, Matlab y Surfer) se obtuvo la máxima altura de la ola. Para el cálculo de la máxima altura de inundación se utilizó un modelo dinámico y energético de una partícula. Esto nos permitirá elaborar un mapa de inundación por maremoto.

El epicentro del terremoto fue localizado sobre la línea de la costa y a 82 km al Nor-Oeste de la localidad de Ocoña (Departamento de Arequipa), siendo la profundidad del foco de 28-30 km; es decir, netamente superficial. El maremoto se inició 15 minutos después de ocurrido el terremoto del 23 de junio con el replegamiento del mar, se replegó hasta 200 metros en Ático y Ocoña y a su retorno inundó las playas entre 30 a 50 metros por la desembocadura del río Ocoña.

## SUMMARY

The June 23, 2001 at 15:33:15 (local time), the provinces of Camana and Caraveli were hit by an earthquake of magnitude 8.4 Mw and intensities VII and VIII on the Mercalli scale, the epicenter was located in South Coast of Peru against the city of Atico showing a directivity to the southeast damaging buildings and causing 24 deaths due to the tsunami. With the help of TUNAMI numerical model (using Fortran, Matlab and Surfer programs) the maximum wave height was obtained. For the calculation of the maximum height of flooding a dynamic and energetic particle model was used. This will allow us to make a map of tsunami flooding.

The epicenter was located on the coast line and 82 km north-west of the town of Ocoña (Arequipa), the depth of focus 28-30 km; ie purely superficial. The tsunami began 15 minutes after the earthquake of June 23 with the refolding of the sea, retreated up to 200 meters in Penthouse and Ocoña and his return flooded the beaches between 30-50 meters Ocoña the mouth of the river.

## CAPÍTULO 1

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El Océano Pacífico es considerado como la región más peligrosa del mundo en cuanto a la generación de maremotos. De acuerdo a la información de la base de datos de National Geophysical Data Center (NGDC/NOAA) han ocurrido hasta la actualidad 2400 eventos. La causa de esta gran actividad sísmica es debido a la presencia de zonas de subducción que bordean la Cuenca del Pacífico. En particular, el Oeste de América del Sur es la zona de mayor subducción, donde el casquete litosférico (Conocido como placa Oceánica) desciende por debajo de todo un continente. El proceso de subducción de la placa Oceánica de Nazca bajo la placa Suramericana es la razón principal por la cual se presenta una alta actividad sísmica en la región, donde grandes sismos con magnitudes mayores a 8.0 Mw se generan cada 5 a 10 años (Kulikov y Rabinovich, 2005). En este contexto, el Perú se encuentra localizado en esta zona donde se presenta una alta actividad sísmica a nivel mundial.

En la región del sur de Perú, ocurrió el sismo de Camaná del 23 de junio del 2001 a las 15:33:13 (hora local) de magnitud 8.4 Mw con epicentro en 16.15° S, 74.4° O, en la vecindad de la Ciudad de Ático, departamento de Arequipa con una profundidad focal de 38 km; el cual produjo un maremoto local que afectó significativamente a las poblaciones costeras de Ocoña, Camaná, Quilca y Matarani, ubicadas en el litoral del Sur del Perú. En el valle de Camaná el maremoto entró hacia tierra más de 1 km causando la muerte de 24 personas, 52 desaparecidos y cuantiosas pérdidas materiales (Okal et al., 2002). El informe del Equipo Internacional de Estudios Post-Maremoto (ITST, por sus siglas en inglés) reportó alturas de inundación de 3 a 7 m en una franja de 160 km a lo largo de la costa y una altura máxima de ola en Costa de 7 m en Camaná (Okal et al., 2002).

En los últimos 20 años (1994-2014), sismos de gran magnitud con epicentro en el mar o muy cerca a la Costa han causado grandes desastres y pérdidas de vidas humanas a nivel mundial, tales como los eventos de Sumatra 2004, Perú 2007, Chile 2010, Japón 2011. El nombre utilizado para la identificación de estos eventos en los medios de comunicación masiva y en la mayor parte del mundo es el término japonés

**tsunami**, a pesar que en el idioma español se cuenta con el término **maremoto**, el cual etimológicamente y por definición describe muy bien la física y consecuencias de este fenómeno (Ocola y Huaco, 2006). En la Fig. (1.1) se observa la ubicación de Camaná.

Fig. 1.1 Imagen satelital del área de estudio (Fuente: Google Earth).



## 1.2 OBJETIVOS GENERALES

Aplicar el modelo TUNAMI para ilustrar los procedimientos típicos del modelado numérico de maremotos.

Obtener con la aplicación del Modelo Numérico TUNAMI la máxima altura de la ola. Para el cálculo de la máxima altura de inundación se utilizará un modelo dinámico y energético de una partícula.

## 1.3 OBJETIVO ESPECIFICO

Saber cuál es el mecanismo para la generación de un maremoto.

Mediante la aplicación de TUNAMI, explicar cómo se halla la máxima altura de la ola generado por el terremoto en Camaná el 23 de junio del 2001.

#### **1.4 ALCANCE**

El alcance del trabajo tiene como finalidad poder estudiar las zonas afectadas de la provincia de Camaná y la máxima altura de la ola que se genera y hacer en un futuro mapas de inundación con los datos obtenidos y tratar de prevenir este tipo de desastre manteniendo informada a la población.

#### **1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Cuando se generan terremotos de gran magnitud, al cabo de unos minutos se genera un maremoto, por ese motivo los maremotos hoy en día, son temas de investigación y estudio debido a la cantidad de vidas expuestas y a las pérdidas económicas que genera.

Es necesario conocer las causas y las condiciones físicas de la ocurrencia de los maremotos para así poder prevenir y afrontar este tipo de suceso.

Este trabajo monográfico consiste en desarrollar la ecuación para hallar la máxima altura de la ola y estudiar el maremoto de Camaná que fue modelado Por: Mg Jiménez (2010).

## CAPÍTULO 2

### 2.1 MARCO TEÓRICO: SISMOS

El Perú es uno de los países de mayor sismicidad en el mundo debido al proceso de convergencia, presente en su borde Oeste, de las placas de Nazca y Sudamérica dentro del proceso conocido como subducción, el mismo que da origen a los terremotos de mayor magnitud que se haya producido en el Perú (Tavera y Buform, 1998).

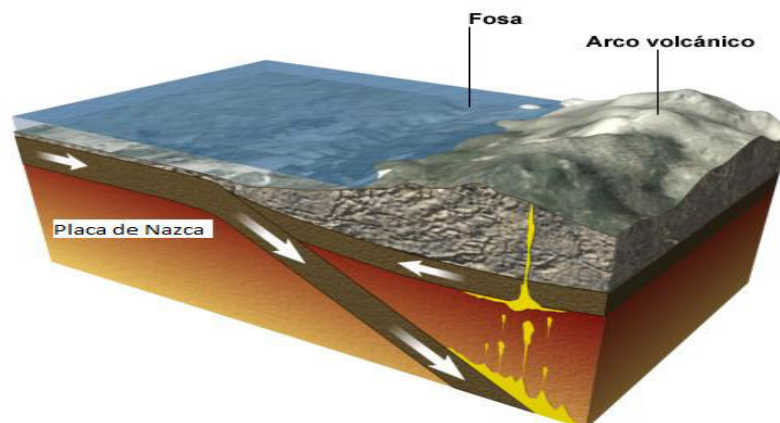
Las zonas de subducción se forman en el límite de convergencia donde se produce la colisión de dos placas tectónicas, de modo que la placa menos densa se dobla hacia abajo y se desliza (subduce) por debajo de la placa más densa (Fig.2.1). Cuando esto ocurre, la fricción entre las dos placas puede causar que la placa superior se adhiera a la placa de subducción y se llegue a distorsionar por este movimiento (Fig.2.2).

Eventualmente, los esfuerzos tectónicos asociados con esta deformación se acumulan a tal punto que ya no pueden ser sostenidos por las fuerzas de fricción entre las placas, generando un movimiento repentino de la placa superior hasta que rápidamente retorna a su lugar, la interacción se denomina: sismos tectónicos en zonas de subducción.

Los movimientos tectónicos de las placas en las zonas de subducción tienen una fuerte componente vertical lo cual permite desplazar el volumen de agua hacia arriba o bajar su nivel, ocasionando un desplazamiento súbito del agua que produce finalmente como consecuencia un maremoto (Thomas and Burbidge, 2009).

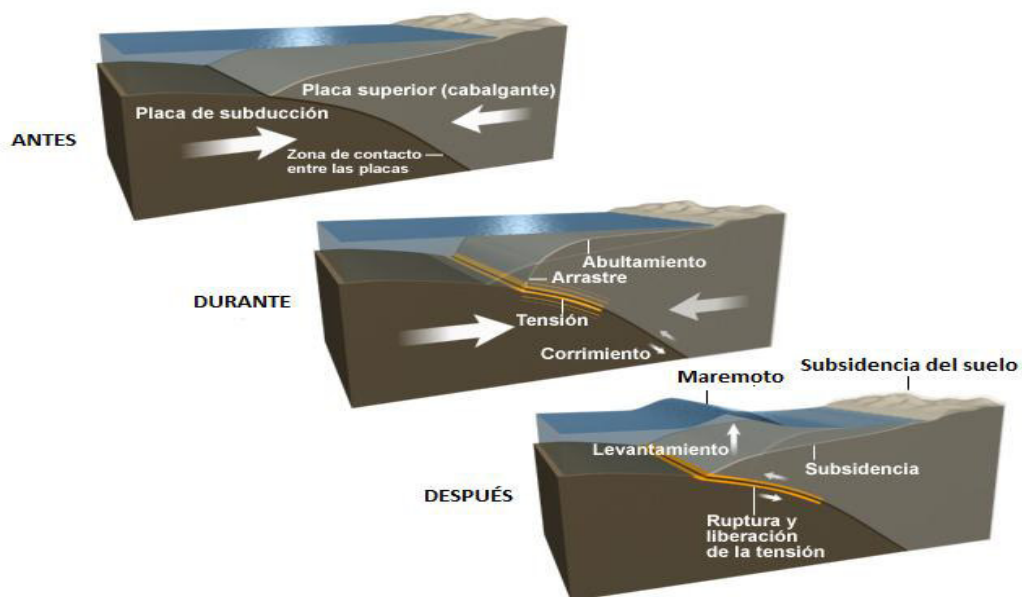


Fig. 2.1 Proceso de subducción entre placas Cuando esto ocurre, la fricción entre las dos placas puede causar que la placa superior se adhiera a la placa de subducción y se llegue a distorsionar por este movimiento.



Fuente de la figura: ©The COMET Program

Fig. 2.2 Proceso de generación del maremoto en una zona de subducción.



Fuente de la figura: ©The COMET Program

Los esfuerzos tectónicos asociados con esta deformación se acumulan a tal punto que ya no pueden ser sostenidos por las fuerzas de fricción entre las placas, generando un movimiento repentino de la placa superior hasta que rápidamente retorna a su lugar, la interacción se denomina: sismos tectónicos en zonas de subducción.

## **2.2 CONCEPTOS GENERALES**

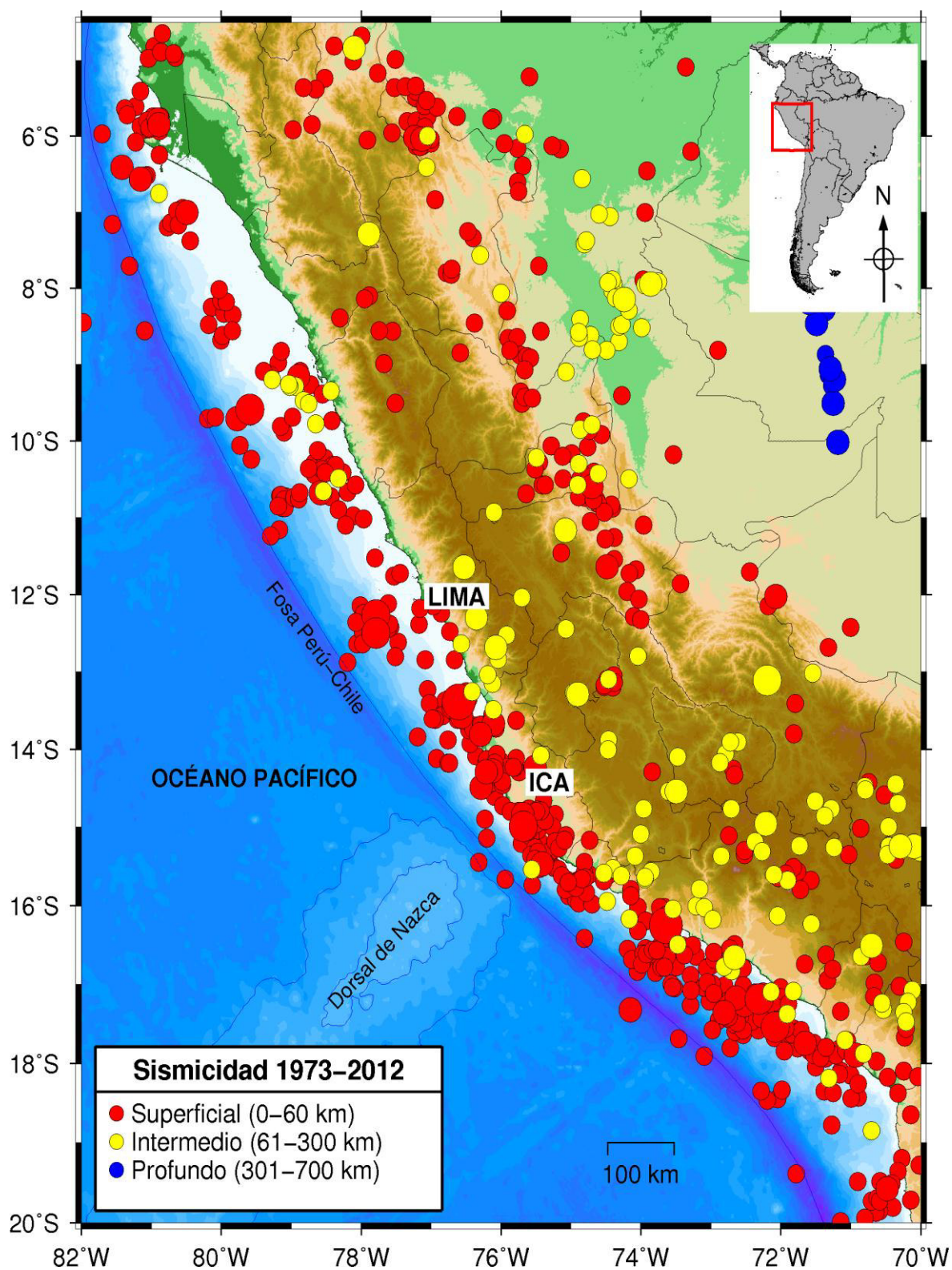
### **2.2.1 SISMICIDAD DEL PERU**

La actividad sísmica en el Perú es debida, principalmente, al proceso de subducción entre la placa de Nazca y la placa Suramericana, con una velocidad de convergencia, aproximadamente 7-8 cm/año (Sella et al., 2002) orientada a 78° NE. El margen Oeste de Suramérica, donde la litósfera oceánica subduce bajo la Continental, es uno de los más activos en la Tierra, siendo su alta velocidad de convergencia la que permite que se genere un fuerte acoplamiento entre ellas, produciendo sismos de diferentes magnitudes a diversos niveles de profundidad. Como resultado de este proceso se ha formado la fosa Peruano-chilena y la Cordillera Andina en diferentes períodos orogénicos (Tavera, 2008).

Según Tavera (2008), las características de la sismicidad en el Perú y en detalle para la región central, han sido descritas por diversos investigadores; siendo los principales resultados relacionados con la distribución de los focos sísmicos en superficie en función de la profundidad. En el borde Oeste del Perú, entre la fosa y la línea de Costa, se concentran los sismos con foco superficial < 60 km, que al presentar magnitudes elevadas producen diferentes grados de destrucción en superficie, cuyo origen se debe a los procesos compresivos que se desarrollan sobre la superficie de contacto entre las placas de Nazca y Suramericana. Estos sismos se presentan con mayor frecuencia en la región central de Perú y los de magnitudes mayores o iguales a 4.5 ML son sentidos en superficie con intensidades mínimas del orden de III en la escala Mercalli Modificada (MM). (Tavera, 2008).

Se observa la sismicidad del Perú en la fig. (2.3)

Fig. 2.3 Sismicidad del Perú desde 1973-2012 (Fuente: Moggiano, 2013).



## 2.3 MAREMOTO

Desde un punto de vista físico, un maremoto es un tren de ondas de gravedad de periodo largo (Periodos en el rango de 10 a 60 minutos) que se propagan en la superficie del Océano producto de la perturbación en el lecho oceánico que desestabiliza la columna de agua. Las principales causas que originan un maremoto pueden ser (Kulikov et al., 2005).

- a) Sismos tectónicos
- b) Erupciones volcánicas submarinas
- c) Deslizamientos de tierra bajo el lecho oceánico
- d) La caída de meteoritos en el océano

Algunos de los términos populares de uso en el Perú, además de maremoto, son: Maretazo y Marejada. Estos dos términos están definidos por la Real Academia Española (2001) como sigue:

**Maretazo:** “Golpe de la maretá”. **Maretá** es el “Movimiento de las olas del mar cuando empiezan a levantarse con el viento o a sosegarse después de la borrasca” (Borrasca: “Tempestad, tormenta del mar”). (Fuente: Ocola\_2006)

**Marejada:** “Movimiento tumultuoso de grandes olas, aunque no haya borrasca”.

Salvat Editores (2004) define marejada como el “Estado de la mar que se caracteriza por las olas de 0.5 a 1.25 m, corresponde al Grado 3 de la escala de Douglas”. (Fuente: Ocola\_2006)

### 2.3.1 Características físicas de las ondas del maremoto

Las características físicas de las ondas del maremoto presentan atributos que determinan el tamaño, la forma y el aspecto general de una onda, como se describe a continuación:

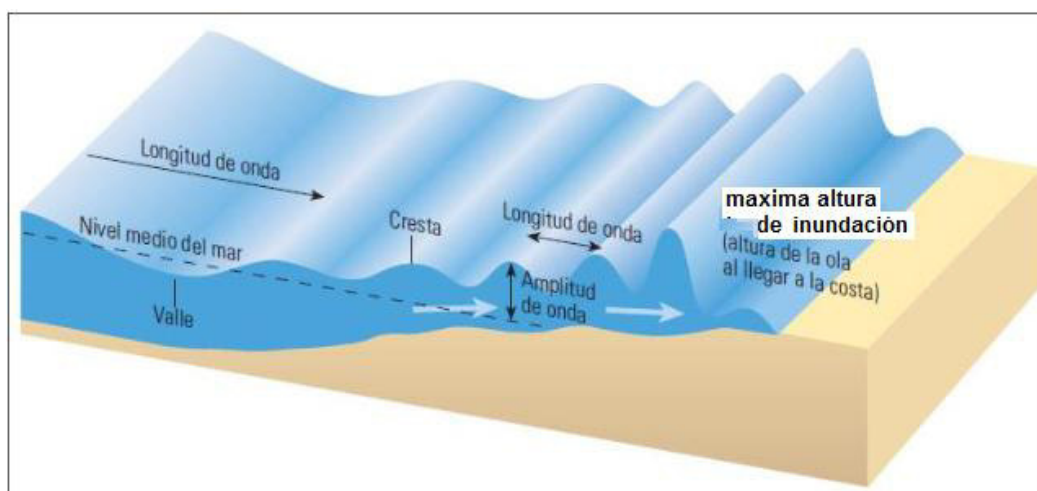
- **Cresta**, es el punto más alto de la onda.
- **Valle**, de una onda es su punto más bajo en donde se miden dichas altitudes.
- **Altura de onda**, es la distancia vertical entre la cresta y el valle, en la Fig. 2.4 se muestra cómo se mide la altura de la ola.

Fuente: (Moggiano, 2013)

Durante su desarrollo, un maremoto está dividido en tres fases o procesos físicos independientes: Generación, propagación e inundación. (Fig. 2.5)

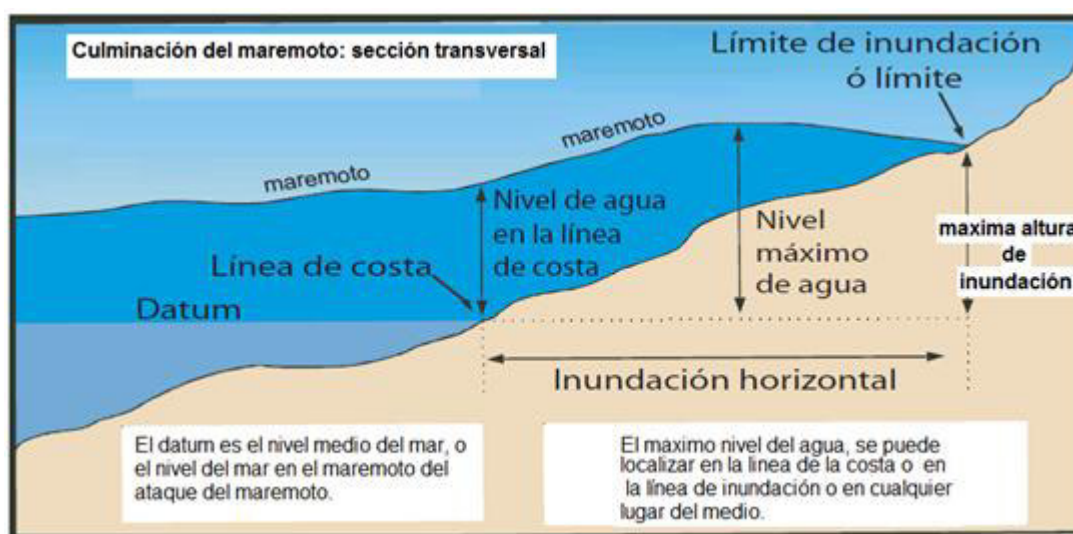
Existe un modelo de fuente sísmica para modelar el proceso de generación, se basa en la teoría de Mansinha y Smylie (1971).

Fig. 2.4. Características físicas de una onda de maremoto.



(Fuente: Moggiano, 2013)

Fig. 2.5 Esquema de la fase de inundación del maremoto en costa y definición de máxima altura de inundación. Adaptado de *Tsunami Glossary*, UNESCO-IOC, 2006.



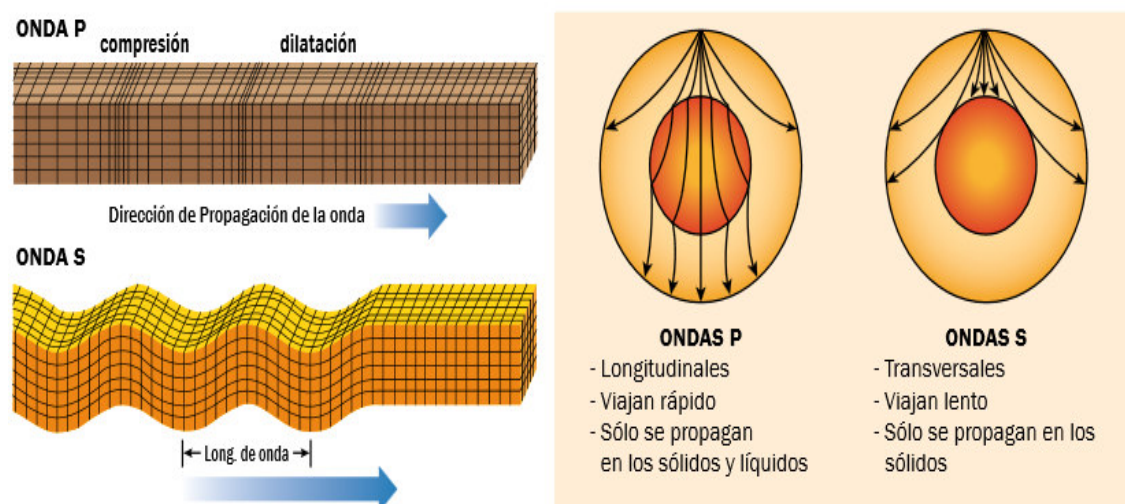


## 2.4 ONDAS SÍSMICAS

Sólo tres tipos básicos de ondas elásticas producen la sacudida que se siente y causa daños en un terremoto. De los tres tipos sólo dos se propagan en el interior de las rocas. La más rápida de estas ondas internas es llamada apropiadamente primaria u onda P. Su movimiento es el mismo que el de una onda de sonido en que, a medida que se propaga, comprime y dilata alternativamente la roca (véase fig. 2.4). (Bruce A. Bolt)

Estas ondas P, como las ondas sonoras, son capaces de viajar a través, tanto de rocas sólidas, tales como montaña de granito, como de materiales líquidos, tales como magma volcánico o el agua en los océanos. Es importante mencionar también que debido a su naturaleza, semejante a la del sonido, cuando las ondas P emergen desde el interior de la tierra a la superficie, una fracción de ellas puede ser transmitida en la atmósfera como ondas sonoras, audibles para los animales y las personas si sus frecuencias están dentro del rango del oído\* ( Bruce A. Bolt)

Fig. 2.6. Ondas sísmicas P (primarias) y S (secundarias). Fuente: revista\_tsunami2014



## 2.5 DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DE MAREMOTOS

El análisis estadístico de la distribución de maremotos causados por diversos mecanismos de generación ha sido compilado por *Global Historical Tsunami Database* de NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC/NOAA) con información de acontecimientos históricos desde el año 2000 A.C hasta la actualidad

para el Océano Atlántico, Índico, Pacífico y los mares del Mediterráneo y del Caribe (NOAA, 2015).

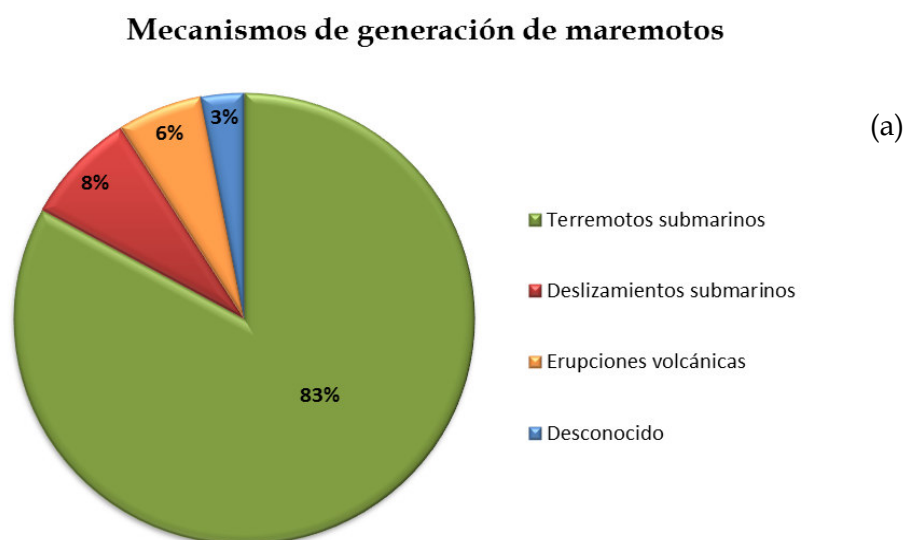
La distribución global de estos eventos es:

- 63% en el Océano Pacífico,
- 21% en el Mar Mediterráneo,
- 5% en el Océano Atlántico,
- 4% en el Mar del Caribe,
- 6% en el Océano Índico
- 1% en el Mar Negro.

La distribución según el mecanismo de generación es el siguiente:

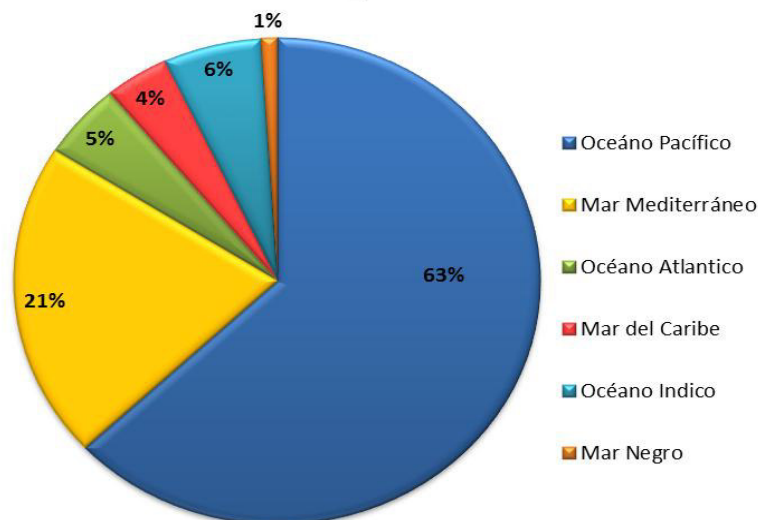
- Sismos submarinos (83%),
- Deslizamientos de tierra submarina (8%),
- Erupciones volcánicas (6%),
- Procesos Desconocidos (3%).

Fig. 2.7 a) y b) Estadística de maremotos en cuanto al mecanismo de generación y distribución a nivel global.



Fuente de datos: *National Geophysical Data Center (NGDC/WDS) Global Historical Tsunami Database, Boulder, CO, USA*. Disponible en [http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml)

**Distribución global de maremotos**



Fuente de datos: *National Geophysical Data Center (NGDC/WDS) Global Historical Tsunami Database, Boulder, CO, USA*. Disponible en [http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml)

## 2.6 MAREMOTO DEL 23 DE JUNIO DEL 2001

Uno de los últimos maremotos producidos en Perú es el generado por el terremoto ocurrido el día sábado 23 de junio de 2001 ( $M_w = 8.4$ ) a horas 15 con 33 minutos (hora local) y una intensidad de VII en la escala de Mercalli. (Jiménez 2010).

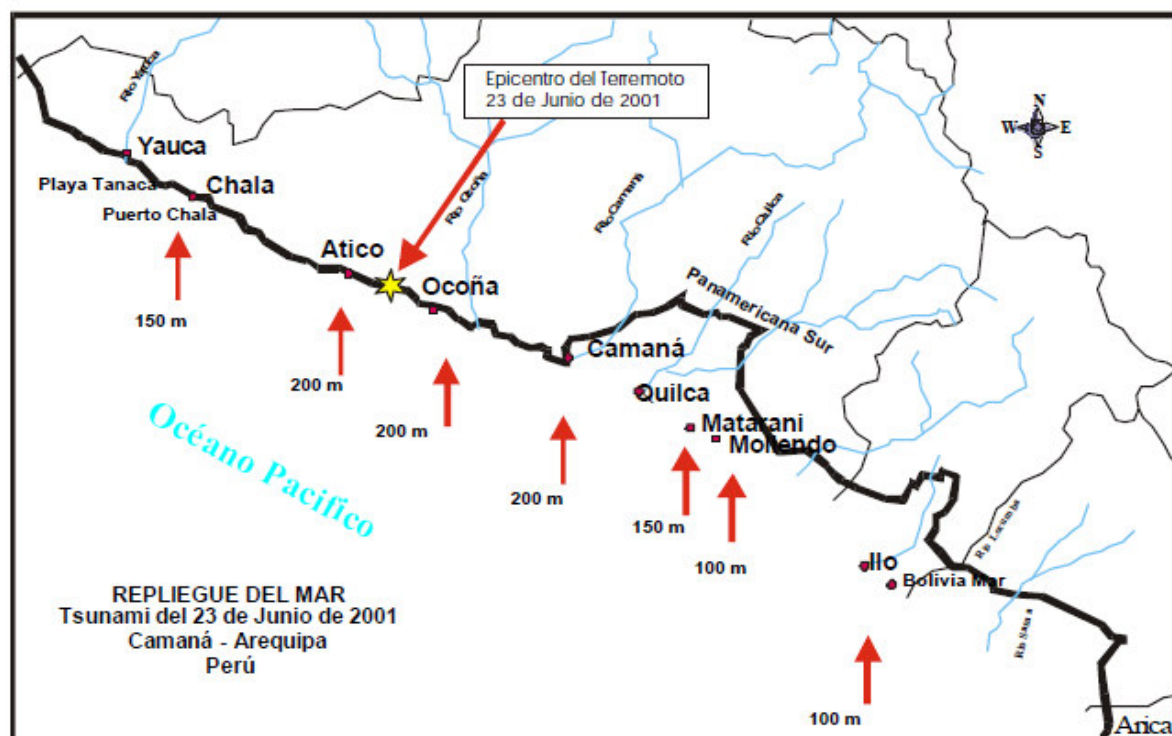
El epicentro del terremoto fue localizado sobre la línea de la costa de Arequipa y a 82 km al Nor Oeste de la ciudad de Ocoña y cerca de la línea de costa, (Camaná 2001. IGP), de acuerdo a INDECI, el maremoto ocasionó la pérdida de varias vidas humanas y la desaparición de 70 personas. Un total de 200,000 personas fueron afectadas por el terremoto (Rodríguez- Marek y Edwards 2003).

Este maremoto se inició 15 minutos después de ocurrido el terremoto del 23 de junio en Camaná con el replegamiento del mar, el mismo que se produjo mayormente entre las playas de las localidades de Chala e Ilo con distancias que oscilaron entre 100 y 200 metros (Fig.2.8). En las playas de las localidades de Chala y Ático fue calmado y su retorno suave sin ocasionar daño; mientras que, entre Ático y Ocoña, la mar se replegó hasta 200 metros y a su retorno inundó las playas entre 30 a 50 metros por la desembocadura del río Ocoña. En la localidad de Camaná, el



repliegue de la mar alcanza distancias de 200 metros y a su retorno ocasionó severos daños en las playas. Finalmente en las localidades de Quilca, Matarani, Mollendo e Ilo la mar se retiró entre 100 a 150 metros y a su retorno no ocasionó daños.

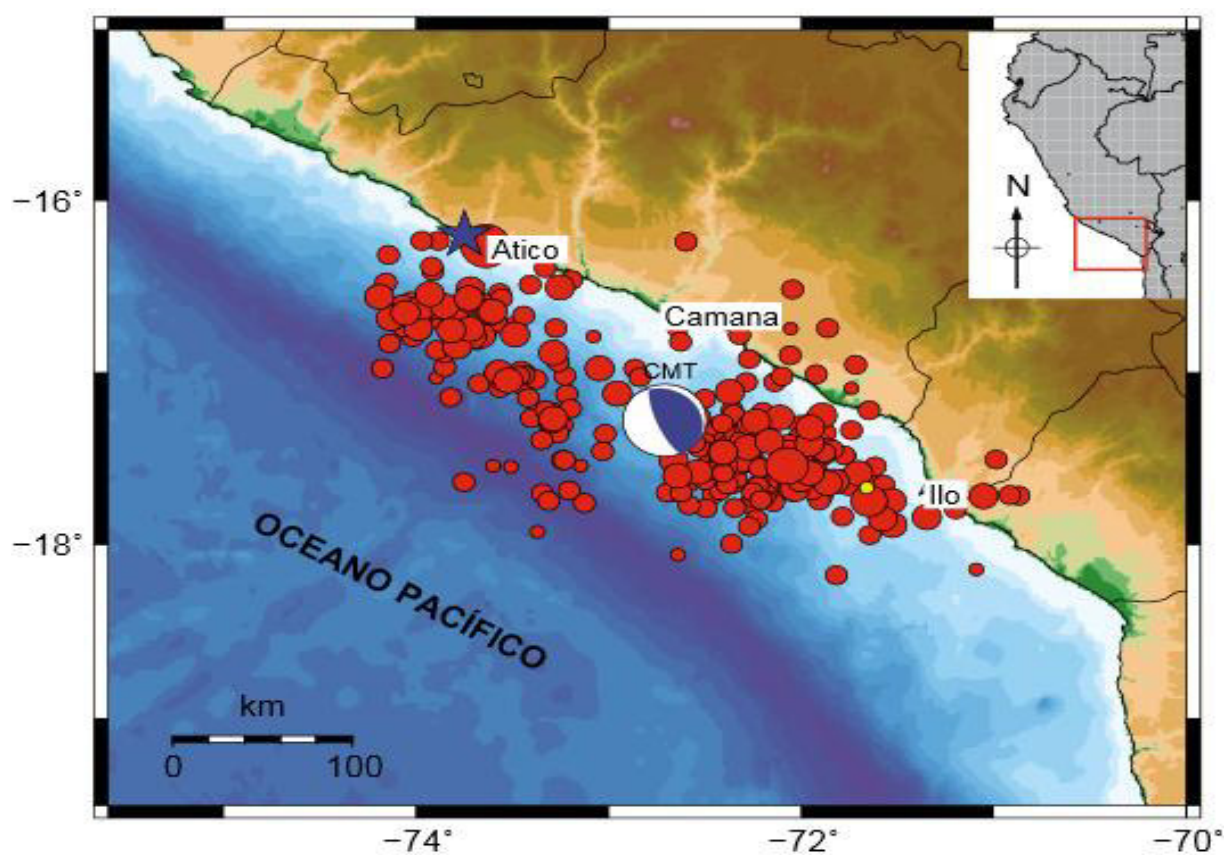
Fig. 2.8 Niveles medios de replegamiento del mar (Terremoto de la región sur del Perú del Perú del 23 de junio 2001. CNDG (2002).



Fuente: Terremoto de la región sur del Perú del Perú del 23 de junio 2001. CNDG (2002).

Fig. 2.9 Ubicación del epicentro (en estrella azul) y réplicas del sismo de Camaná.

(Periodo de 23 de junio a 23 de julio). El círculo blanco- azul representa al mecanismo focal. Datos obtenidos del USGS-NEIC



Fuente: Revista\_tsunami 2014.

## **CAPÍTULO 3**

### **MODELO NUMÉRICO DE MAREMOTOS**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

Los modelos numéricos de maremotos utilizan ecuaciones matemáticas para describir procesos físicos, los cuales se utilizan como herramientas en los centros de investigación de universidades a nivel internacional y Centros de Alerta de Maremotos ubicados en muchos países con el objetivo de obtener pronósticos de tiempos de arribo de la primera ola, alturas de olas debido al maremoto en costa. Estos resultados son plasmados en los mapas de peligro de inundación por maremoto, cuya utilidad en la mitigación de riesgo ante este fenómeno es de gran importancia.

A continuación se realiza una breve descripción del modelo numérico utilizado para la simulación de maremotos: (Sullón.2007)

Modelo Tunami: de la escuela japonesa.

Modelo Commit Most: de la escuela Norte-americana.

Modelo WinITDB: de la escuela rusa

Todos estos modelos se basan en la teoría de propagación de ondas en aguas someras y en el desarrollo e integración de las ecuaciones de energía y momentum por medio del método de diferencias finitas. (Jiménez et al., 2010)

En el ámbito nacional, los primeros esfuerzos, entre otros, de investigación en modelado numérico de maremotos se deben al Lic. Manuel Sullón, quien trajo al Perú los modelos y códigos del modelo numérico TUNAMI para su implementación. Sus resultados fueron expuestos al congreso Internacional Von Humboldt 2007, realizado en Lima Perú. (Jiménez et al., 2010).

### 3.2. METODOLOGÍA

Según la relación empírica de Papazachos 2004, entre la magnitud de momento sísmico

M ( $M_w$ ) y los parámetros focales L (km) y W (km), a lo largo y ancho del área de ruptura para zonas de subducción:

$$\begin{aligned} \text{Log (L)} &= 0.55M - 2.19 \\ \text{Log (W)} &= 0.31M - 0.63 \} \\ \text{Log (U)} &= 0.64M - 2.78 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Para que el sismo libere suficiente energía en un cierto lapso de tiempo y que esta sea eficientemente transmitida. Por lo general: Magnitud de momento  $M_w > 7.0$

El momento Sísmico  $M_0$  se define como:

$$M_0 = \mu LWU \quad (3.2)$$

Donde  $\mu = 4,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$  es el módulo de la rigidez del medio y U es la dislocación de la falla. Por la regla general, en los centros internacionales de alerta de maremotos del Pacífico el umbral de alerta por maremotos se establece en  $10^{29} \text{ Nm}$  (que corresponde a una magnitud  $M_w = 7.2$ ). Todos aquellos terremotos con momento sísmico igual o mayor son potencialmente maremotogénicos. El valor del momento sísmico  $M_0$  determinará el tamaño y los efectos del maremoto. En la siguiente (tabla 1). Se observa los valores del momento sísmico:

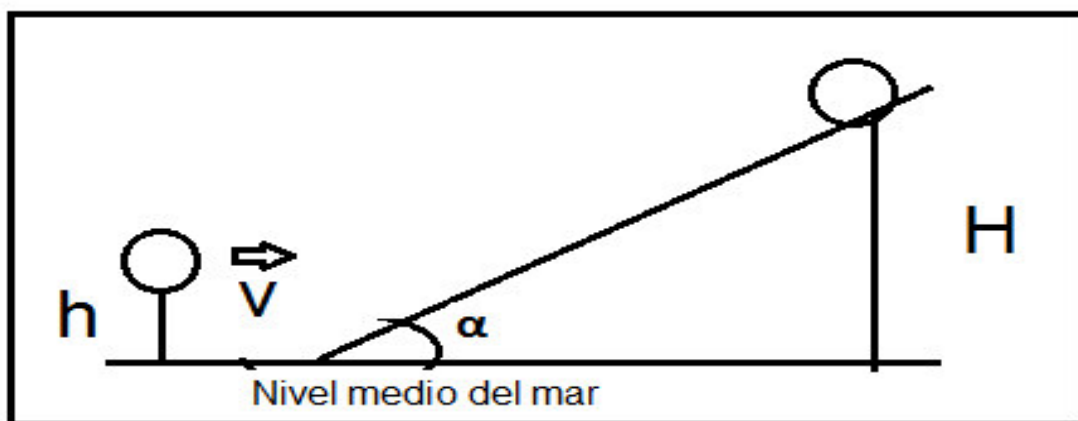
Tabla 1. Clasificación de maremotos según el momento sísmico escalar. (Talandier 1993)

RANGO DE VALORES	TIPO DE MAREMOTO
$M_0 < 10^{20} \text{ N.m}$	No se genera maremoto
$10^{20} < M_0 < 10^{21} \text{ N.m}$	Probablemente maremoto pequeño y local
$10^{21} < M_0 < 5 \cdot 10^{21} \text{ N.m}$	Maremoto pequeño
$5 \cdot 10^{21} < M_0 < 2 \cdot 10^{22} \text{ N.m}$	Potencialmente destructivo
$M_0 > 2 \cdot 10^{22} \text{ N.m}$	Grande y destructivo

### 3.2.1 Fase de inundación: Cálculo de la máxima altura de inundación

Mediante un análisis dinámico y energético a partir de las leyes de la conservación de la energía y de las leyes de la dinámica de una partícula. Esta aproximación es aplicable a una región geográfica puntual y específica. Consideremos el siguiente diagrama:

Fig. 3.1. Esquema del modelo dinámico de una partícula:



Fuente: Simulación Numérica del Maremoto del callao de 1746)

Del gráfico:

$$mgh + 1/2mv^2 = mgH + f_r d \quad (3.3)$$

Donde: **h** = altura de la ola

**H** = altura de la máxima altura de inundación

La fuerza de rozamiento es:  $f_r = \mu N = \mu mg (\cos\alpha)d$  (3.4)

Donde:

**μ**= coeficiente de rozamiento

**α** = ángulo de inclinación de la pendiente

**m** = masa de la partícula

Reemplazando (3.4) en (3.3) obtenemos:

$$mgh + 1/2mv^2 = mgH + \mu mg (\cos\alpha)d \quad (3.5)$$

Por lo tanto:

$$H = h + v^2/2g - \mu d (\cos\alpha) \quad (3.6)$$

Pero de la figura se obtiene:

$$\text{sen}\alpha = H/d$$

Despejando: “d” obtenemos:

$$d = H/\text{sen}$$

Reemplazo d en H, la ecuación (3.7) en (3.6)

$$H = h + v^2/2g - \mu H (\text{ctg}\alpha) \quad (3.8)$$

Despejando H

$$H + \mu H (\text{ctg}\alpha) = h + v^2/2g \quad (3.9)$$

Se obtiene:

$$H = \frac{\left(\frac{v^2}{2g}\right) + h}{1 + \mu \text{ctg}\alpha} \quad (3.10)$$

El coeficiente de fricción  $\mu$  y el coeficiente de rugosidad de Manning  $\eta$  para fluidos están relacionados por la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{2gn^2}{D^{1/3}} \quad (3.11)$$

De aquí despejamos el valor de n

$$\text{Se obtiene:} \quad n = \sqrt{\frac{\mu D^{1/3}}{2g}} \quad (3.12)$$

Para D congruente con  $h/2$  y reemplazando los valores obtenidos en (3.11), en la ecuación (3.10) tenemos:

$$H = \frac{(v^2/2g) + h}{1 + \frac{2gn^2}{(h/2)^{1/3}} \text{ctg } \alpha} \quad (3.13)$$

Siendo:

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

$v$  : Velocidad de propagación de las ondas ( $\text{m/s}$ )

Fuente: (Simulación Numérica del Maremoto del callao de 1746).

### 3.3 PRE- PROCESAMIENTO

Los modelos numéricos de inundación para maremotos requieren de alta resolución de datos topográficos y batimétricos que caracterice lo mejor posible la morfología del fondo marino costero y superficial (somero), los cuales son utilizados como principales datos de entrada, además de los parámetros de la fuente sísmica.

#### 3.3.1 Recopilación de datos topográficos y batimétricos

##### a) Selección de datos batimétricos

La batimetría (topografía del fondo marino) global es obtenida de GEBCO cuya resolución es de  $30''$ . La batimetría local es obtenida de la información de sondeos de las Cartas Náuticas PERÚ HIDRONAV 2261 (escala 1: 15000), 2262 (escala 1: 50000), 2263 (escala 1: 10000) y 2264 (escala 1: 15000) en la Proyección UTM WGS-84, todas elaboradas y publicadas por la Dirección de Hidrografía y Navegación.

##### b) Selección de datos topográficos

La topografía global es obtenida de SRTM 90. La topografía local proviene del levantamiento topográfico realizado por la DHN.

### 3.4 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN Y GRILLAS

1) Editar (de la línea 20 a 23) y ejecutar: `nesting_grids.m` ----> `my_grids.m`

Esto es para delimitar las grillas anidadas A, B, C y D, donde A es la más grande y D es la más pequeña:

OJO:  $0^\circ < \text{longitud} < 360^\circ$

2) Editar y ejecutar: `making_grid_a.m` (con los datos de la región\_a = [sur norte oeste este])

Leer indicación en la línea 9.

3) Para obtener batimetría fina correr: `extraer_xyz.m` (lee "Perú.dat") ----> `xyz.dat`

Utilizar los límites de la región D. OJO: Batimetría (+)

4) Para obtener la topografía fina (región D), debe ubicarse en el directorio correspondiente:

`extraer_topo.m` OJO:  $-180^\circ < \text{longitud} < 180^\circ$

En forma automática se grabará un archivo de datos: `save xxx.mat` A `maplegend - mat`

Ejecutar: `mat2vec.m` opción (2) (se crea el archivo "topofino.txt")

Añadir el archivo "topofino.txt" a "xyz.dat" OJO: Topografía (-)

5) Editar `joint_depths.m` y modificar la línea 28.

Utilizar los límites de la región A (OJO: el archivo de entrada es "xyz.dat")

Al ejecutar se creará el archivo: `depths_xyz.dat`

6) Programa SURFER para interpolación de grillas:

Gris Data

Escoger la ruta de `depths_xyz.dat`

Scattered Data Interpolation ---> General



Colocar los valores de las grillas A, B, C, D y los  $I_x$ ,  $J_x$

Output Grid File: Tipo GS ASCII (\*.grd), cambiar de nombre: depths\_x.grd  
<Enter>

Se obtiene: depths\_a.grd, depths\_b.grd, depths\_c.grd, depths\_d.grd

7) Cambio de formato DSAA a Matlab (ver línea 46 a 53 de "my\_grids.m"):

grid\_X = surf\_mat ('depths\_X.grd'); X = a, b, c, d

Luego grabar: save grid\_X.grd grid\_X -ascii

Ejecutar el comando: paso7.m

8) Función frontera: boundary\_a.m (ver línea 69 a 71 de "my\_grids.m"):

Load grid\_a.grd;

[grid\_a] = boundary\_a (grid\_a);

Save grid\_a.grd grid\_a -ascii;

### 3.5 MODELO DE FUENTE SÍSMICA

La condición inicial para que se genere un maremoto está dada por la deformación del fondo oceánico en la componente vertical, lo cual está representado por las características de la ruptura del sismo. En esta monografía, se utilizó un modelo de fuente sísmica homogénea.

Se debe trabajar con el modelo de fuente sísmica homogénea pero se deberá realizar la interpolación para los dominios B, C y D.

9) Ejecutar el programa "paso12.m"

Esto interpolará la deformación en los dominios B, C, D (ver "my\_grids.m", línea 57 a 60 y línea 75 a 89). Se obtiene: deform\_X.grd X = b, c, d

### 3.6 CORRIDA DEL MODELO DE PROPAGACIÓN E INUNDACIÓN

10) Editar tsunami.for y cambiar los parámetros  $I_x$ ,  $J_x$  ( $x = A, B, C, D$ ) y DELTA (línea 5, 6 y 8).

De acuerdo a los valores de "my\_grids.m"

11) CFL\_control <Enter> Condición:  $DT < \min(dta, dtb, dtc, dtd)$ . Ver línea 9 de "tsunami.for"

12) El tiempo de simulación total será:  $T = KE * DT$  en segundos, donde KE = número de pasos, DT = duración de cada paso. Para cambiar el número de pasos modificar la línea 10: KE.

$KA * DT$  = intervalo de tiempo entre cada marco del video.

13) Cambiar los parámetros IDS, IDE, JDS, JDE (línea 11) de acuerdo a la grilla de deformación.

14) La fricción entre el fluido y el terreno está dado por el coeficiente de Manning:  $FM = 0.025$  Ver línea 12 de tsunami.for

15) Cambiar: LAB, LBC, LCD (líneas 36 a 38)

Cambiar "extremo sur de latitud en cada dominio: BLATX, X=A, B, C, D (líneas 43 a 46)

16) Para colocar un mareógrafo sintético: mareógrafo.m <Enter>  
Luego, modificar la línea 116 de "tsunami.for":  $ZD(a, b, 2)$

17) Compilar y ejecutar el programa tsunami.for  
! g77 tsunami.for  
! a.exe

18) Para obtener una animación: anima.m  
Para obtener los archivos \*.png: animados.m  
Para obtener un video: avi = png2avi ('archivo', 'directorio')  
Ejemplo: avi = png2avi ('pisco.avi', 'd:\maremoto')

19) Ejecutar: `mom_a` para ver un mapa de máxima altura de olas (directividad), de isócronas y una gráfica altura de ola vs latitud.

20) Ejecutar: `mom_d` para ver un mapa de inundación y un mareograma sintético para la zona de la grilla D.

21) Ejecutar: `perfinun.m` para obtener un archivo con los límites de inundación en formato XYZ, Latitud y longitud. Se crea el archivo “`limite.txt`”. Para el caso de Camaná, ejecutar (si es necesario) el archivo “`selec_lim.m`”

22) Luego correr: `cor2kml.m` para obtener un archivo kml para observar el límite de inundación en Google Earth.

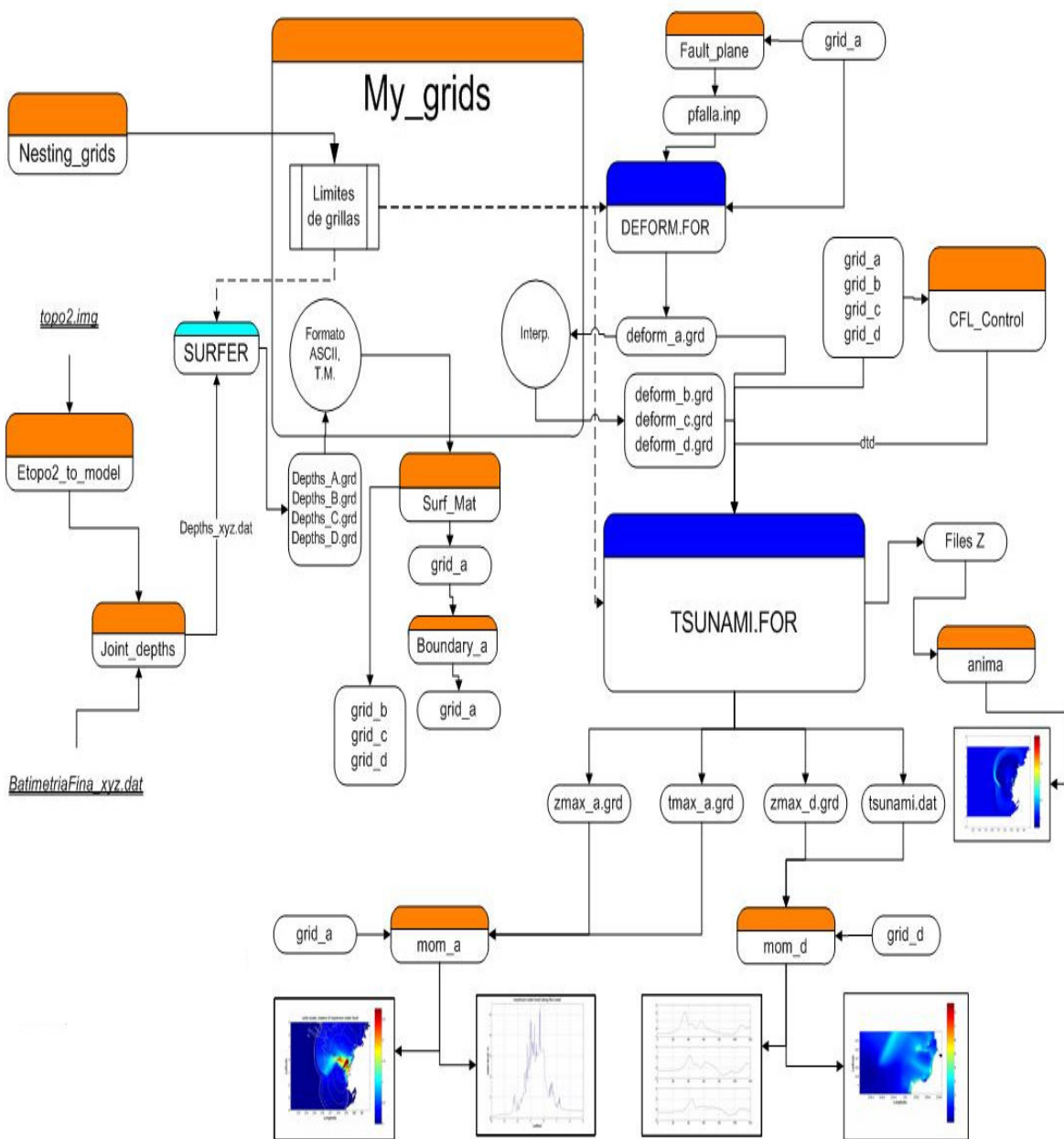
23) Para obtener una matriz de altura de ola, campo de velocidades, ejecutar el archivo:

“`mat2dec.m`”

RESOLUCION HORIZONTAL: 30 m

- 1) Modificar “`nesting_grids.m`”: línea 29:  $dy = 1;$
- 2) Modificar “`making_grid_a.m`”: línea 6:  $DA = 27/3600;$
- 3) Modificar “`deform.for`”: línea 32:  $DA = 27.0*1853.0/60.0$
- 4) Modificar “`tsunami.for`”: línea 8:  $DELTA =$

Fig. 3.2. Diagrama de Flujo del Modelo Numérico Tunami



## CAPÍTULO IV

### 4.1 ÁREA DE ESTUDIO

La provincia de Camaná se ubica en la zona centro occidental de la Región Arequipa a 172 km de la capital del Departamento de Arequipa y tiene alrededor de 56 mil habitantes. Predomina como actividad económica la agricultura. Limita por el norte con las provincias de Condesuyo, Castilla, Arequipa (San Juan de Sigüas) por el Nor-Oeste con la provincia de Caravelí, por el sur con el Océano Pacífico, por el este con las provincias de Islay y Arequipa. Este terremoto remeció a esta región y un maremoto devastó los balnearios costeros de la ciudad de Camaná.

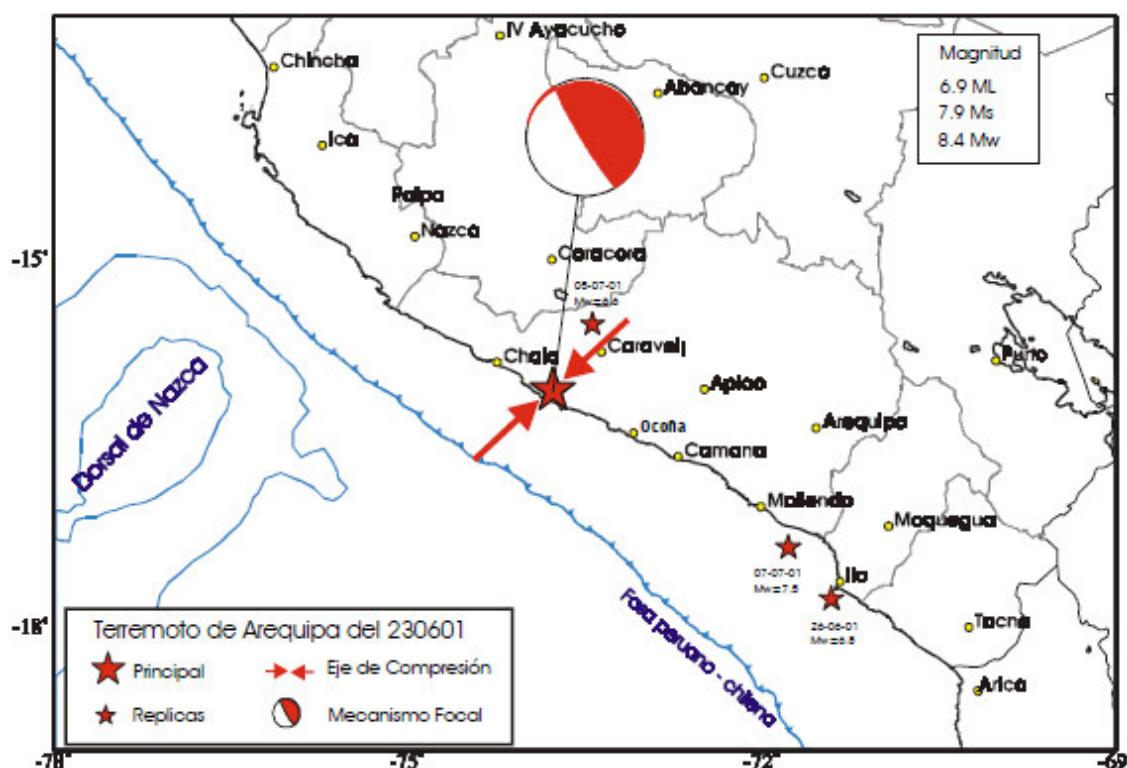
Fig. 4.1 Mapa de inundación según observaciones *ínsitu* se puede apreciar la inundación del Tsunami desde la zona agrícola hasta el balneario.



Fuente: Dirección de Hidrografía y Navegación.

En la fig. (4.2). Se indica la ubicación de 3 réplicas principales y los valores de magnitud en diferentes escalas. En la (tabla 2). Los Parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001.

Fig. 4.2. Mecanismo Focal y orientación del esfuerzo principal que dio origen al terremoto del 23 de Junio de 2001. Se indica la ubicación de 3 replicas Principales y los valores de magnitud en diferentes escalas



Fuente:(Camaná- 2001.igp)

Están los parámetros hipocentrales del terremoto. (tabla 2)

Tabla 2. Parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001  
Y de tres de sus réplicas principales

Fecha .dd:mm:aa	H. Origen .hh:mm:ss.s	Lat.-S	Long.-W	Prof. km	Mag.	Agencia
23:06:01	20:23:04.4	16.20°	73.75°	29	6.9 ML	IGP
23:06:01	20:33:13.0	16.15°	73.40°	33	8.4 Mw	NEIC
26:06:01	04:18:31.6	17.73°	71.34°	31	6.8 Mw	NEIC
05:07:01	13:53:49.7	15.56°	73.45°	69	6.6 Mw	NEIC
07:07:01	09:38:43.0	17.38°	71.78°	26	7.5 Mw	NEIC

Fuente:(Camaná-2001.igp)

## 4.2 SOFTWARE

Fortran 90: Es un lenguaje de programación de alto nivel de propósito general, procedimental e imperativo, que está especialmente adaptado al cálculo numérico y a la computación científica.

Matlab 2013: Es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (Se utiliza en el pre-procesamiento y en el post-procesamiento de los datos).

Surfer 7.0: Con Surfer se puede experimentar la relación entre fórmulas y formas, en las matemáticas y el arte, de una manera interactiva. Puede introducir ecuaciones simples que producen bellas imágenes, que son superficies en el espacio (se utiliza para interpolar las grillas anidadas para obtener un modelo digital de elevación).

## 4.3 MÉTODO

**4.3.1** Para hallar los parámetros focales de la falla para zonas de subducción partimos de las relaciones empíricas de Papazachos (2004):

$$\text{Log}(L) = 0.55M - 2.19$$

$$\text{Log}(W) = 0.31M - 0.63$$

$$\text{Log}(U) = 0.64M - 2.78$$

El momento sísmico  $M_0$  se define como:  $M_0 = \mu LWU$

Siendo:  $\mu = 4.5 \times 10^{10} \text{N/m}^2$  es el módulo de rigidez del medio. (Talandier 1993)

**4.3.2** La batimetría  $h(r)$  se obtiene a partir del modelo “Etopo2v2” para toda la región del mar del Perú. Por interpolación 2D se halla la profundidad del lecho marino.

**4.3.3** Con la ecuación siguiente se halla la máxima altura de la ola.

$$H = \frac{(v^2/2g) + h}{1 + \frac{2gn^2}{(h/2)^{1/3}} \operatorname{ctg} \alpha}$$

Con la ayuda del Modelo Numérico Tunami (que utiliza los programas Fortran, Matlab y Surfer) se obtendrá la máxima altura de la ola. Para el cálculo de la máxima altura de inundación se utilizará un modelo dinámico y energético de una partícula. Esto nos permitirá elaborar un mapa de inundación.



## **CAPÍTULO V**

### **5.1 PARÁMETROS HIPOCENTRALES DEL SÍSMO**

Fecha	: 23 Jun 2001
Hora local	: 20h 33 min (GMT)
Latitud	: 16.20° S
Longitud	: 73.75° w
Profundidad	: 38 km
Magnitud	: 8.4 Mw
Intensidad en Camaná	: VIII
Localización	: 82 km al Nor- Este de la ciudad de Ocoña.

Estos parámetros focales fueron obtenidos del IGP (Instituto Geofísico del Perú) y del NEIC (National Earthquake Information Center) para obtener los resultados a continuación.

### **5.2 DESCRIPCIÓN DEL VALOR DE LA INTENSIDAD**

VII. Difícil de mantener en pie. Sentido de los conductores. Objetos suspendidos tiemblan. Muebles rotos. Daño a edificios del tipo D incluye grietas. Las chimeneas débiles se rompen a ras del tejado. Caída de cielos rasos, ladrillos sueltos, piedras, tejas, cornisas, también antepechos no asegurados y ornamentos de arquitectura. Algunas grietas en edificio de tipo C. Olas en estanques, agua enturbiada con barro. Pequeños corrimientos y hundimientos en arena o montones de grava. Campanas grandes suenan. Canales de cemento para regadío dañando. (Bruce A. Bolt)

VIII. Conducción de coches afectada. Daño en edificio del tipo C, colapso parcial. Algún daño a construcciones del tipo B; nada en edificio de tipo A. Caída de estuco y algunas paredes de mampostería. Giro, caída de chimeneas, rimeros de fábricas, monumentos, torres depósitos elevados. La estructura de las casas se mueve sobre los cimientos si no están sujetas; trozos de pared sueltos, arrancados. Ramas de árboles rotas. Cambio en el caudal o temperatura de fuentes y pozos. Grietas en suelo húmedo y pendientes fuertes. (Bruce A. Bolt)

Se observa los parámetros del maremoto de Camaná 2001 (tabla 3)

Tabla 3. Magnitud y origen de parametros para el movimiento uniforme (Bruno, 2001)

Magnitude (Mw)	Strike	Dip	Slip angle	Length (km)	Width (km)	Slip (m)	Top depth (km)	Southern left corner of fault	
								Longitude	Latitude
8.4	310°	18°	63°	270.00	95.00	4	29.6 km	72.20°W	18.25°S

**5.2.1** Las grillas A, C y D se crean mediante un algoritmo desarrollado en matlab. Las coordenadas de estas grillas se utilizan como entrada para realizar la interpolación espacial con el programa software surfer, utilizando la técnica “krigging”, el estado de arte de interpolación espacial utilizando los datos topográficos y batimétricos.

### 5.3 DATOS Y SELECCIÓN DE LOS DOMINIOS DE INTEGRACIÓN

Para modelar las zonas de inundación por maremoto se necesitan los siguientes datos:

**Batimetría global** Para simular la grilla más grande donde se propaga el maremoto. Los datos son tomados del modelo Etopo 2.

**Topografía local** para modelar la inundación producida por el maremoto. Se toman datos de levantamiento topográfico in situ así como datos de topografía satelital (SRTM).

**Topografía local** Para modelar la inundación producida por el maremoto. Se toma datos de levantamiento topográfico insitu así como datos de topografía satelital (SRMT 90).

Con todos estos datos se obtiene un modelo digital de elevación y se procede a elaborar 4 grillas anidadas: A B, C y D. Donde la grilla A es la más grande y

contiene al área de ruptura. La grilla D es la más pequeña, pero los datos son más densos y contiene la región donde se desea evaluar la inundación. Los límites de las grillas son las siguientes:

Región a\_ [-20      -13      282.0      290.0].

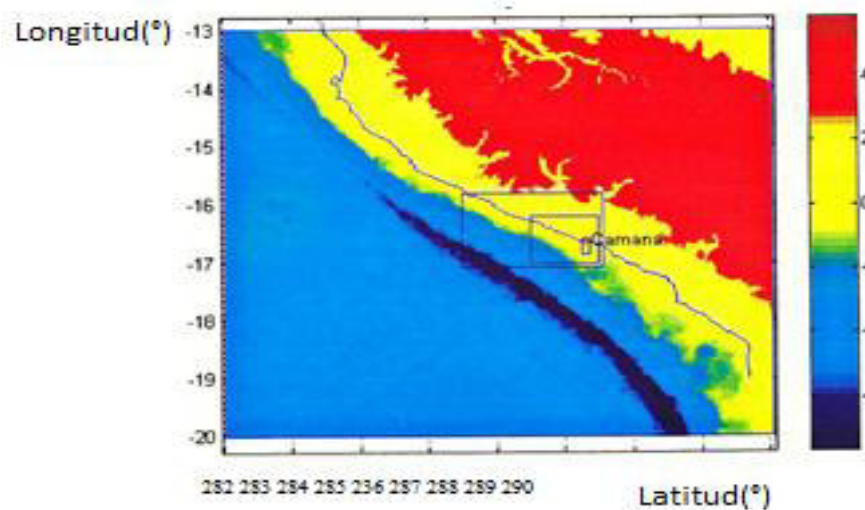
Región b\_ [17      15.8      285.5      287.5].

Región c\_ [-17      -16.2      286.5      287.5].

Región d\_ [16.85      16.59      287.258      287.373].

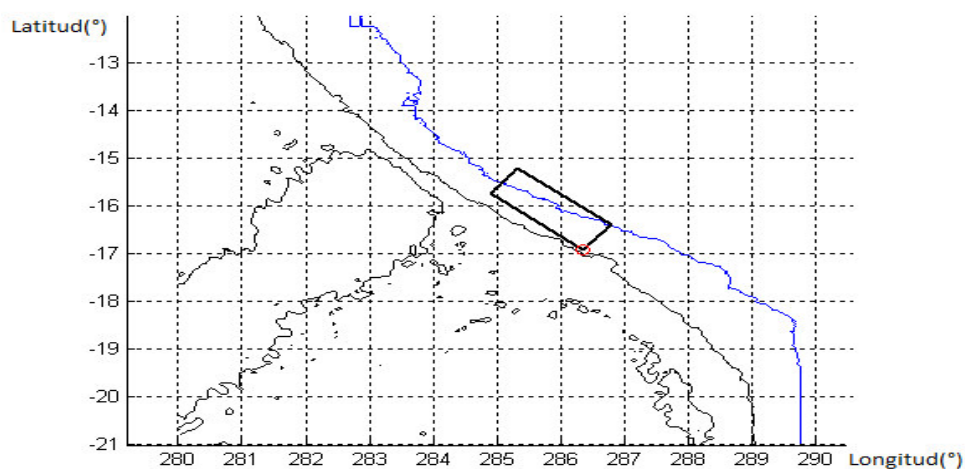
En la (Fig.5.1). Se observa las grillas anidadas.

Fig.5.1. Grillas anidadas para el presente modelo. (Jiménez 2010)



En la (Fig.5.2). Se observa el modelado de la fase de generación la grilla D. El punto rojo es el epicentro del terremoto.

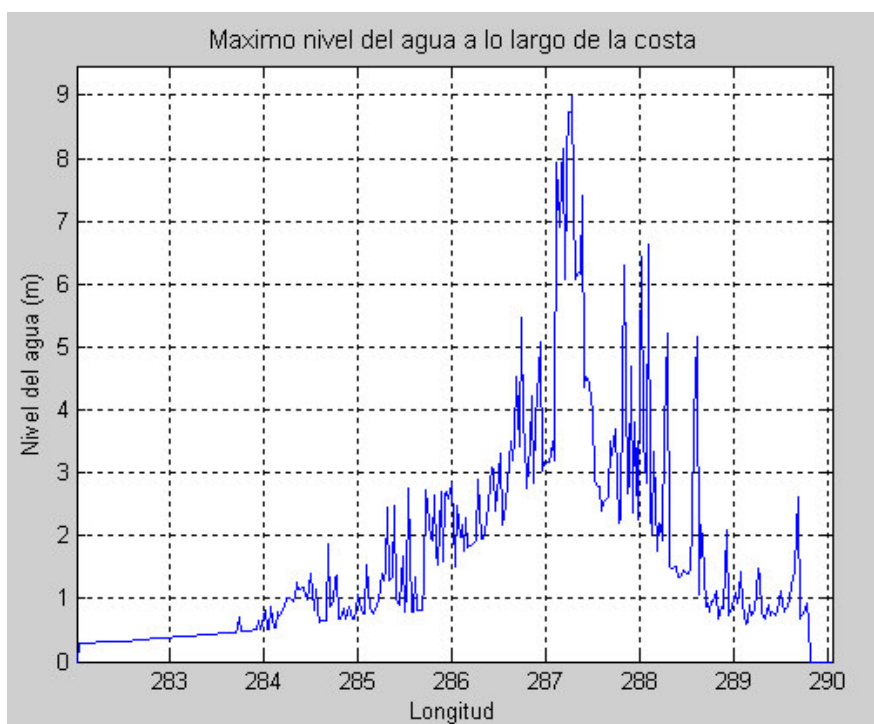
Fig. 5.2 Modelado de la fase de generación (Geometría del área de ruptura)



(Jiménez 2010)

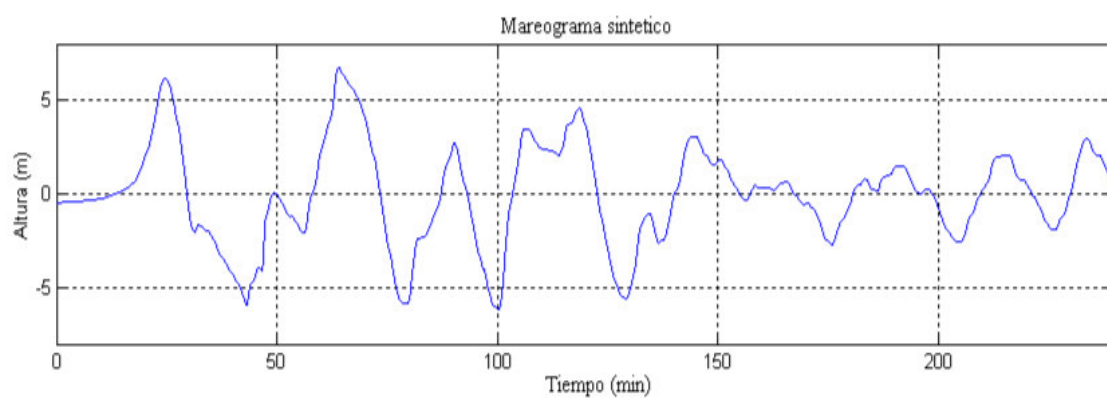
En la (Fig. 5.3). Se observar que la máxima altura de la ola, según el modelo, en la línea de costa fue de 9 m en la posición correspondiente a los  $-72.75^\circ$  de longitud, fuera del área de interés que corresponde a la grilla D. Para el valle de Camaná la máxima altura de la ola fue de 7 m. (Jiménez, 2010)

Fig. 5.3 Altura de inundación o run-up (Jiménez 2010)



En la (Fig.5.4). Se puede observar un mareograma sintético ubicado en la región de la grilla D. El arribo de la primera ola ocurre aproximadamente a los 14 min. La máxima altura de la ola es alrededor de 7 m, regulado que concuerda con la observación del insítu. Al cabo de 4 horas la amplitud de las ondas se ha reducido aproximadamente a 2 m. (Jiménez, 2010).

Fig. 5.4 Mareograma sintético en la región de inundación (Jiménez, 2010)



## CONCLUSIONES

El maremoto generado por el sismo de Camaná 2001 es calificado como destructivo. De acuerdo a la información obtenida del trabajo  $M_w = 8.4$ .

Los daños ocasionados a las construcciones como la muerte de decenas de personas nos indican que la comunidad de Camaná se encontraba en estado vulnerable con respecto a su capacidad para prevenir este tipo de desastres.

De acuerdo a los resultados verificados con la aplicación del modelo numérico TUNAMI. Se obtuvo una máxima inundación vertical de 7 m.

En la localidad de Camaná la máxima inundación horizontal alcanza distancias de 200 m y a su retorno ocasiono severos daños a las playas.

El tiempo de arribo de la primera ola, será alrededor de 14 a 15 minutos aproximadamente, lo cual proporciona poco tiempo para realizar una evacuación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bruce A. Bolt (1981). University of California, Berkeley. “Terremotos”. Pag. 25-26.
- Kulikov, A Rabinovich y R. Thomson (2005). Estimation of Tsunami Risk for the coast of Perú and Northern Chile. *Natural Hazards* 35. 185-209.
- Intergovernmental Oceanographic Commision 2006. Tsunami, the Great Waves. IOC-UNESCO.Brochure 2006-2.Paris, UNESCO.
- Jiménez C, (2010) Simulación numérica del maremoto de Camaná del 2001, *Revista de Investigación de Física* 13, 101302752.
- Jiménez et al., (2010), Informe Técnico del Proyecto SIRAD, Investigación sobre el peligro de tsunami en Lima y Callao. PNUD/ SDP-052/2009.
- Moggiano, N. (2013). Modelado Numérico del maremoto de pisco 2007. Tesis de licenciatura en física UNMSM.
- National Reseach Council (2015), “Tsunami Warning and Preparedness: An Assessment of the U.S. Tsunami Program and the Nation’s Preparedness Efforts”. Committee on the Review of the Tsunami Warning and Forecast System and Overview of the Nation’s Tsunami Preparedness.
- Ocola L. y P. Huaco (2006). El maremoto de Chimbote del 21 de febrero de 1996: Observaciones de campo u medidas de mitigación. Instituto Geofísico del Perú. Pág. 31.
- Okal, E.A., L. Dengler, S. Araya, J. C. Borrero, B. Gomer, S. Koshimura, G. Laos, D. Olcese, M. Ortiz, M. Swenson, V.V Titov, and F. Vegas (2002). A field survey of the Camaná, Peru tsunami of June 23, 2001, *Seismol. Res. Letts.*, 73: pp. 904-917.
- Rodriguez- Marek y Edwards (2003) Southern Peru Earthquake of 23 June 2001. Reconnaissance Report, Earthquake Spectra; 19 (suppl.)
- Sullón, M. (2007). Tesis de Magíster inconclusa, UPG Facultad de Ciencias Físicas, UNMSM [FCF-Fenlab]. Dinámica de los maremotos y creación de mapas de inundación mediante el modelado numérico, págs. 1-67.
- Tavera, H., Buform, E (1998). Sismicidad y sismotectónica de Perú. *Física de la tierra*, N° 10, pp.187-219. Madrid.
- Tavera, H., (2008) El Terremoto de Pisco Perú del 15 de Agosto 2007 (7.9 Mw). Instituto Geofísico del Perú, Dirección de Sismología-CNDG. Lima, Perú.

**PÁGINAS WEB:**

Marina de Guerra del Perú:

[https://www.dhn.mil.pe/cnat/pdf/revista\\_tsunami2014.pdf](https://www.dhn.mil.pe/cnat/pdf/revista_tsunami2014.pdf)

Real Academia Española (RAE) 22va Edición: <http://www.rae.es/>

Ultimo acceso: 15/10/15.

Simulación Numérica del Maremoto del callao de 1746.

[http://www.cprm.gov.br/cong\\_lat\\_peru/paper/H/H06.swf](http://www.cprm.gov.br/cong_lat_peru/paper/H/H06.swf).

Ultimo acceso: 15/10/15.

Terremoto de la Región Sur de Perú del 23 de Junio de 2001.

CNDG (2002), Pg.19-30

<http://bvs.per.paho.org/texcom/cd050662/tavera.pdf>

Último acceso: 10/08/15.



## ANEXO

### A. TIPOS DE CONSTRUCCIONES

Construcciones A, B, C, D. Para evitar ambigüedades de lenguaje de calidad de la construcción, ladrillo u otro material, se especifica por La siguientes letras:

**CONSTRUCCIONES A.** Estructuras de acero y hormigón bien diseñadas, calculadas para resistir fueras laterales. Buena construcción, materiales de primera calidad.

**CONSTRUCCIONES B.** Estructuras de hormigón armado, no diseñadas en detalle para resistir fuerzas laterales. Buena construcción y materiales.

**CONSTRUCCIONES C.** Estructuras no tan débiles como para fallar la unión de las esquinas, pero no reforzada ni diseñada para resistir fuerzas horizontales. Construcción y materiales corrientes.

**CONSTRUCCIONES D.** Construcción de materiales pobres, tales como adobe; baja calidad de construcción. No resistente a fuerzas horizontales.

Fuente: Bruce A. Bolt (1981). University of California, Berkeley.